خراسان بزرگ: سال هشتم، شماره (۲۶)، بهار ۱۳۹۶
Quarterly bulletin of Greater Khorasan: Vol.8, No.26 Spring 2017

مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های سنجنده آلودگی هوا با روش‌های همپوشانی و چند شاخصه AHP و TOPSIS *(مطالعه موردی منطقه۹ شهرداری مشهد)

سمیه رخساری طالمی[۱]
مهدیه ویسه[۲]
قدیر صیامی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۲
شماره صفحات: ۳۸-۲۵

چکیده

امروزه مشکلات زیست محیطی شهرهای مهم دنیا، از جمله وضعیت نامطلوب کیفیت هوا، شهروندان آن‌ها را در معرض خطرات جدی قرار داده است. از جمله راهکارهای بنیادی در راستای مقابله با اثرات مخرب این پیامد زیست محیطی قرن حاضر ، ارتقای شرایط سنجش آلودگی هوا با توجه به تکنولوژی‌های مدرن است. یکی از مهم‌ترین ملاحظات در پیاده‌سازی یک سیستم بهینه کنترل آلودگی هوا، انتخاب مکان‌های مناسب برای ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا است. در پژوهش حاضر، تلاش شده است با کمک لایه های اطلاعاتی طرح جامع شهر مشهد(تهیه شده توسط شهرداری مشهد در سال ۹۳)، طی چهار مرحله، با بررسی و مرور منابع و استانداردها و انتخاب محدوده منطقه شهری نیازمند پایش، با تعیین نوع سنجنده، و برآورد تعداد آنها بر اساس تراکم جمعیتی، استراتژی اصلی مکان یابی آغاز گردد. به نحوی که در این استراتژی، معیارهای مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا بر اساس نوع عملکرد سنجنده پایش آلاینده های هوا در قالب پنج معیار فضای سبز، پارکینگ ها و تعمیرگاه های بزرگ، ایستگاه های اتوبوس و تاکسی، مراکز انرژی، معابر شهری، انتخاب گردید و پس از وزندهی به معیارها با روش سلسله مراتبی در نرم افزار Expert Choice، با همپوشانی لایه های منتسب به این معیارها در Arc GIS، نقاط کاندید مشخص گردید.از تکنیک تاپسیس در نرم افزارMCDM engine برای رتبه بندی مناطق کاندید و انتخاب بهترین مکان برای سنجنده استفاده شده است.محاسبات تاپسیس نشان داد که مکان بهینه انتخابی دارای بالاترین ارزش شاخص نزدیکی(۰/۵۳)در بین مکانهای کاندید است.

واژه‌های کلیدی : مکان یابی، آلودگی هوا، سنجنده، همپوشانی، AHP، TOPSIS

۱. کارشناس ارشد عمران-نقشه برداری گرایشGIS ، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) s.rokhsari@alumni.ut.ac.ir
۲. کارشناس ارشد برنامه ریزی شهری دانشگاه بین المللی امام رضا علیه السلام mahdiyeh.viseh@gmail.com
۳. استادیار دانشگاه بین المللی امام رضا علیه السلام q.siaami@gmail.com

مقدمه

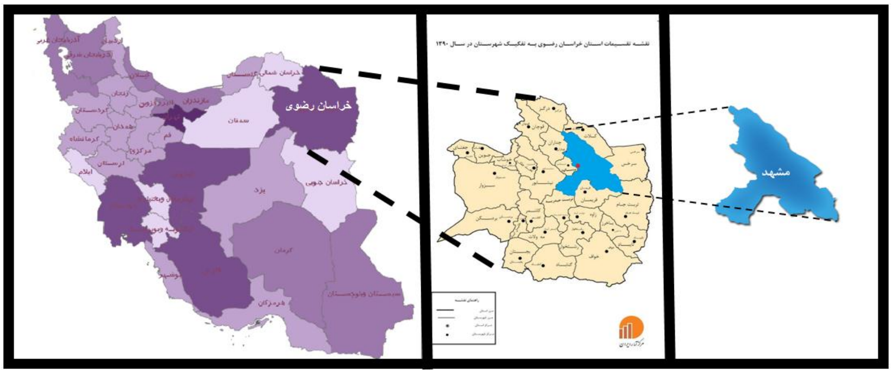
امروزه بسیاری از شهرهای مهم دنیا با مشکلات زیست محیطی مواجه هستند، که در رأس آن وضعیت نامطلوب و بیمارگونه کیفیت هوا می باشد، در نتیجه قرار گرفتن شهروندان در معرض هوای آلوده در شهرهای بزرگ اجتناب ناپذیر است (اردکانی و همکاران، ۸۵ : ۳۳). امروزه آلودگی به یکی از چالش های اصلی مدیریتی کشورها تبدیل شده است، به گونه ای که کشورها علاوه بر سیاست ها و اقدامات درون مرزی خود، ساماندهی آلودگی را در حوزه بین الملل نیز دنبال می کنند. از جمله مصادیق آلودگی، آلودگی هوا است که با توجه به ماهیت آن شیوع بیشتری داشته است (خبری و همکاران، ۹۲: ۲۶). آلودگی هوا یکی از تبعات رشد شهرنشینی، افزایش جمعیت، استفاده بیش از حد از منابع سوخت های فسیلی، به کار نگرفتن تکنولوژی های سازگار با محیط زیست و از همه مهم تر نبود مدیریت صحیح محیط زیست است. این آلودگی در کشورهای در حال توسعه و به ویژه در کلان شهرها نمود بیشتری دارد و کشور ما ایران نیز از این نظر دچار مشکلات فراوانی است (Behran & Ghamkar, 2007). با پیشرفت تکنولوژی وبرنامه ریزی های کلان کشور در زمینه محیط زیست شهری، می توان به پایداری توسعه های آتی و رفع آلودگی هوا در سطح کلان شهرها پرداخت (اکبری و دیگران، ۹۴: ۵۴۵) و لازمه این امر، اتخاذ تصمیمات زیر بنایی در این حوزه توسط مدیران حوزه محیط زیست شهری است که هدف این پژوهش نیز در همین راستا قرار دارد. اگرچه در اغلب شهرهای بزرگ و صنعتی دنیا، افزایش جمعیت و منابع آلاینده هوا منجر به تولید هوایی آلوده و ناسالم شده است لیکن در راستای مقابله با اثرات مخرب این پیامد زیست محیطی قرون حاضر، می توان راهکارهای بنیادی همچون استقرار ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا در مناطق در خطر بالای آلودگی هوا را اتخاذ نمود. در پایش آلودگی هوا، داده‌های آلودگی هوا برای انجام مطالعات و تصمیم‌گیری در مورد کاهش و کنترل آن، عنصر کلیدی به حساب می‌آیند که به کمک ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ها تهیه می‌شوند (چرندابی، آل شیخ و کریمی؛ ۹۱: ۶۹). امروزه حسگرها یکی از تکنولوژی های مهم کاربردی در ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا هستند که می‌توانند با پایش شاخص‌های مختلف آلودگی هوا به سلامت شهروندان کمک کنند. یکی از مهم‌ترین این شاخص‌ها کمیتی به نام AQI است که یک ابزار کلیدی جهت آگاهی از کیفیت هوا، نحوۀ اثر آلودگی هوا بر سلامت و روش های محافظتی در برابر آلودگی هوا است(ندافی و همکاران، ۹۰: ۶). با توجه به اینکه آلودگی هوا وابستگی شدیدی به مکان دارد و از مکانی به مکان دیگر متفاوت است (Hamraz et all, 2014: 435)، با جانمایی درست ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها، وضعیت واقعی‌تری از آلودگی هوا قابل دست‌یابی است. بنابراین یکی از مهم‌ترین ملاحظات در اجرای یک سیستم کنترل آلودگی هوا انتخاب مکان‌های مناسب برای ایستگاه‌ها می‌باشد (اشرفی و همکاران، ۸۶: ۱). در راستای دست‌یابی به این اهداف، بررسی مطالعات مختلف و گسترده‌ای که در سراسر دنیا انجام گرفته است ضروری می‌نماید که در ادامه به مواردی از آن ها اشاره شده است:

کفاش چرندابی و آل شیخ (۱۳۹۰) با استفاده از مفاهیم تصمیم گیری چند معیاره و روش پرامتی روش نوینی را جهت مکان‌یابی ایستگاه‌های سنجنده آلودگی هوا پیشنهاد داده‌اند. در طرح دیگری توسط اشرفی و همکاران (۱۳۸۶) برای جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در تهران با عنایت به تعریف مقیاس‌های همسایگی (مناطق حومه‌ای) و چگال (مناطق پرترافیک و شلوغ)، تعدادی ایستگاه در هر مقیاس در نظر گرفته شده است و برای جانمایی ایستگاه‌ها در مقیاس چگال از تحلیل همبستگی داده های ایستگاه‌های موجود استفاده شده است. در تحقیق موفق و همکاران (۱۳۸۸) در «ضوابط و استانداردهای مکانیابی ایستگاه های سنجش آلودگی هوا» با توجه به طبقه بندی های مختلف در خصوص ایستگاه های ثابت و محترک سنجش آلودگی هوا بر حسب محل قرارگیری و آلاینده های مختلف، تجربیات کشورهای آمریکا و فرانسه وانگلستان و نیز ایستگاه های فعلی سنجش آلودگی هوای تهران مورد بررسی قرار گرفته و ضمن طبقه بندی ایستگاه ها، نتیجه تحقیقاتشان در خصوص معیارهای عمومی برای تمام انواع ایستگاه های سنجش کیفیت هوای محیط ارائه شده است. کرباسیان و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیق بر روی «مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده ها و مکان یابی تسهیلات حساس با ملاحظه اصل پراکندگی» مدل جدید چند هدفه ای برای مکان یابی تسهیلات حساس و مهم با در نظر گرفتن اصول پدافند غیر عامل و کارآیی نقاط کاندید ارائه نمودند به طوری که هدف حداکثر سازی پراکندگی در جانمایی ها ضمن کاهش ضریب خطا رعایت شده است.

مواد و روش کار

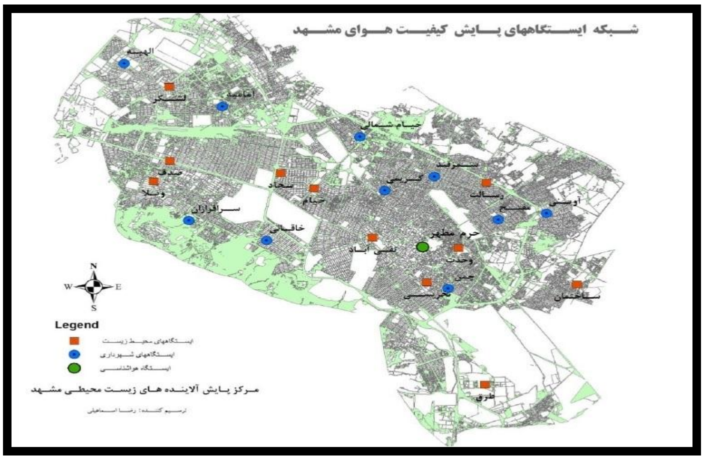
❖ معرفی محدوده مطالعاتی

کلان‌شهر مشهد با مساحتی حدود ۹۱۴۱.۶۷ کیلومتر مربع، جمعیت ۳۰۶۹۹۴۱ نفری دارد (آمارنامه استانداری خراسان رضوی، ۱۳۹۵). این کلان‌شهر در دامنه های شرقی رشته ارتفاعات بینالود و در دشت مشهد قرار گرفته است و به لحاظ ژئومورفولوژی غالب جزو اراضی دشتی محسوب می گردد. بیشتر اراضی این شهر را اراضی مسطح و کم شیب به خود اختصاص می دهد. کم ترین ارتفاع شهر در گوشه‌ی شرقی آن، ۹۲۰ متر و بالاترین نقطه ارتفاعی حدود ۱۵۲۰ متر است و درست در نقطه مقابل در گوشه غربی شهر واقع شده است. شیب غالب در محدوده ی شهرو حریم آن ۰ تا ۲ درصد است و جهت آن در دامنه های شمالی رشته کوه های بینالود غالبا جهت شمال شرقی و شرقی و به سمت دره رودخانه کشف رود است. وزش باد غالب در مشهد نیز طی سالهای ۲۰۰۵-۱۹۹۵ میلادی از جهت جنوب است (مهندسان مشاور فرنهاد، ۸۷). تصویر شماره ۱، موقعیت شهر مشهد را در مقیاس های ملی و استانی نشان می دهد.



تصویر ۱. موقعیت مکانی شهر مشهد در مقیاس استانی و ملی
ماخذ: نویسندگان

و با رجوع به آخرین اطلاعات مربوط به سنجنده های شهر مشهد در سال ۱۳۹۴ کار ثبت و اندازه گیری ۵ آلاینده اصلی(ذرات معلق کوچک تر از ۲.۵ میکرون، منواکسید کربن، دی اکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و ازن) هوای مشهد به صورت پیوسته و لحظه ای توسط ۲۳ ایستگاه سنجش کیفیت هوا که در حال حاضر در سطح شهر مستقر هستند، صورت پذیرفته است (گزارش کیفیت هوای مشهد ،۱۳۹۴). در تصویر (۲)، موقعیت مکانی مجموع ۱۲ ایستگاه اداره کل حفاظت از محیط زیست خراسان رضوی، ۱۰ ایستگاه مرکز پایش آلاینده های زیست محیطی مشهد مقدس با سرمایه گذاری معاونت خدمات و محیط زیست شهری شهرداری مشهد و نیز یک دستگاه از طرف اداره کل هواشناسی خراسان رضوی در سطح کلانشهر مشهد قابل مشاهده است (گزارش کیفیت هوای مشهد ،۹۴).



تصویر۲. شبکه ایستگاه های پایش کیفیت هوای شهر مشهد
ماخذ: گزارش کیفیت هوای مشهد ،۱۳۹٤

❖ روش تحقیق

در این تحقیق به دلیل دسترسی به داده های GIS طرح توسعه و عمران کلانشهر مشهد مقدس و نیاز به تطابق سال آماری نفوس و مسکن با اطلاعات جغرافیایی سال تهیه نقشه ها، در برآورد تعداد سنجنده بر اساس جمعیت، از آخرین آمار سرشماری عمومی نفوس و مسکن استفاده گردید. نرم افزارهای مورد استفاده ArcGIS10.2 (در فرآیند تولید نقشه ها)، Expert Choice (در وزن دهی به معیارها)، و MCDM engine (در انتخاب مکان نهایی و بهینه از بین گزینه ها با روش تاپسیس) بوده اند. پژوهش حاضر، تلاش می کند طی چهار مرحله کلی، با تفکیک محدوده شهری به منظور انتخاب منطقه ای که ضرورت (انجام یا بازنگری) مکان یابی سنجنده ی آلاینده های هوا در آن وجود دارد، به بررسی نوع سنجنده مورد نیاز بپردازد و سپس تعداد سنجنده های مورد نیاز را بر اساس جمعیت ساکنین آن منطقه تخمین زده، و نهایتا وارد استراتژی مکان یابی گردد. اجرای مکان یابی سنجنده‌ها مستلزم گامهایی به شرح زیر است:

الف) مشخص کردن ناحیه منتخب اولیه: انتخاب ناحیه اولیه بر اساس نوع سنجنده ای که نیازمند جانمایی است، خواهد بود. بنابراین ناحیه‌ای انتخاب خواهد شد که بیشترین اولویت برای نصب سنجنده را دارا باشد. لازم به ذکر است که در مواقعی که کل شهر نیازمند تحت پوشش قرار گرفتن فرآیند جانمایی سنجنده ها باشد، کل شهر، و چنانچه جانمایی فقط برای منطقه ای محدود در کل شهر مد نظر باشد، کل فرآیند جانمایی از این مرحله به بعد، به همان منطقه محدود خواهد شد.

ب) مشخص کردن نوع سنجنده: از جمله استانداردهای موجود دنیا در زمینه سنجنده های آلاینده های هوا، به اطلاعات موجود در EPA[1] و EC[2] می توان اشاره نمود. با توجه به انواع شش گانه ی ایستگاه های سنجش استاندارد کشور آمریکا، EPA، یعنی ایستگاه تماس عابرین در مرکز شهر(A)، ایستگاه تماس عمومی در مرکز شهر(B)، ایستگاه تماس ساکنین مناطق مسکونی (C)، ایستگاه هواشناسی در مقیاس متوسط (D)، ایستگاه هوای زمینه (غیر شهری)(E) و ایستگاه مطالعه منابع آلاینده خاص (F) (موفق، دوستی و دلبری، ۸۸) و با توجه به نوع کاربرد مورد انتظار، یکی از سنجنده ها انتخاب گردید و سپس بر اساس استانداردهایی که در زمینه معیارهای مورد نیاز هر یک وجود دارد، به انتخاب لایه های دخیل در محاسبات تحلیل مکانی پرداخته می شود.

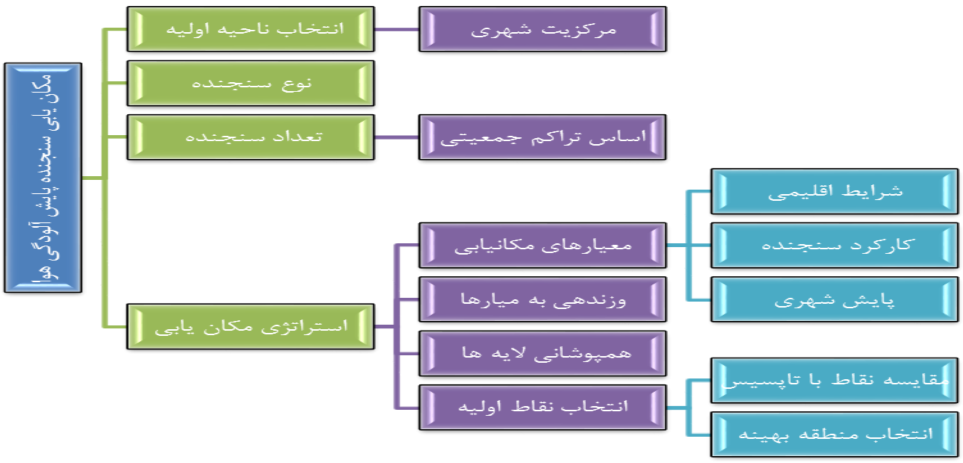
ج) مشخص کردن تعداد سنجنده مورد نیاز: انتخاب تعداد مناسب سنجنده، امکان پوشش مناسب منطقه را به منظور پایش بهتر آلودگی هوا فراهم می‌سازد. در این طرح پیش فرض انتخاب تعداد سنجنده بر اساس جمعیت ناحیه منتخب دارای غلظت بالای آلاینده، نسبت به کل منطقه اجرای طرح است.

د) اجرای استراتژی مکان یابی: با هدف انتخاب بهینه ترین مکان برای نصب سنجنده‌های آلاینده های هوا، گام های پیشنهادی زیر طی می شود:

- **انتخاب لایه‌های مکان یابی:** هدف از این گام، مشخص کردن لایه‌های تاثیرگذار برای مکان یابی سنجنده بر اساس شرایط اقلیمی، کارکرد مناسب سنجنده و نیاز به پایش مناطق شهری است.
- **وزندهی به لایه‌های مکان یابی:** در این مرحله هدف مشخص کردن میزان تأثیر لایه‌های ورودی بر اساس محاسبه وزن آنهاست که به دلیل مرسومیت از روش سلسله مراتبی استفاده شده است. هِروا و روکا (۲۰۱۳) بیان کردند که روش های چند معیاره دارای انعطاف پذیری در امر تصمیم گیری می باشد. همچنین زینگ_مینگ و همکاران (۲۰۱۳) عنوان کردند که روش های چند معیاره دارای دقت زیاد در محاسبات و جزئیات مناسب می باشد. به منظور صحت‌سنجی نتایج وزندهی در پژوهش حاضر نیز از تحلیل شاخص ناسازگاری استفاده شده است.
- **آماده‌سازی لایه‌های مکان یابی:** به منظور آماده‌سازی لایه‌های مکان یابی از توابع تحلیل مکانی مانند توابع محاسبه فاصله هر بخش ناحیه تا مناطق مورد نظر در معیار و توابع کلاسه‌بندی به منظور کلاسه‌بندی لایه مربوط به هر معیار بر حسب اولویت نصب سنجنده استفاده شده است.
- **همپوشانی لایه‌های اولیه برای انتخاب مکان بهینه نصب:** با همپوشانی وزندار لایه‌های مرحله قبل، امکان ترکیب لایه‌ها و انتخاب بهترین نواحی برای نصب سنجنده ممکن است. ناحیه خروجی با بیشترین ارزش حاصل از همپوشانی در نظر گرفته شد که در ادامه، تعدادی مکان پیش فرض در آن برای نصب سنجنده انتخاب شده و به عنوان مکان های کاندید در مرحله بعد استفاده خواهد شد.
- **انتخاب مکان های بهینه نهایی برای نصب سنجنده از بین مکان های پیش فرض اولیه:** هدف از

---
1. United States Environmental Protection Agency
2. European Commission

این مرحله انتخاب مکان های بهینه نهایی برای نصب سنجنده از مناطق پیش فرض اولیه است که با رویکرد ترکیبی تاپسیس–سلسله مراتبی انجام می‌شود. باذکر این نکته که پیش از این مرحله، روش سلسله مراتبی برای محاسبه وزن معیارها استفاده شده است و روش تاپسیس به منظور انتخاب مکان های نهایی با رعایت وزن استفاده خواهد شد. مکان های نهایی دارای بیشترین شاخص نزدیکی در تاپسیس هستند.فرآیند کلی مراحل تحقیق در تصویر ۳ ارائه شده است.



تصویر۳. روش پیشنهادی مکان یابی ایستگاه های سنجش آلودگی هوا
ماخذ: نویسندگان

❖ مدل پیشنهادی

به منظور مکانیابی بهینه سنجنده ها از روش ترکیبی سلسله مراتبی و تاپسیس استفاده شده است به نحوی که روش سلسله مراتبی به منظور مشخص کردن وزن لایه‌های مکانیابی، و روش تاپیسیس به منظور ترکیب نتایج حاصل و مشخص کردن منطقه نهایی و بهینه نصب سنجنده ها به منظور آنکه درک بهتری از روش پیشنهادی احساس شود مورد استفاده واقع گردیده است. در ادامه به بحث در خصوص مدل پشنهادی پرداخته شده است.

❖ وزن دهی به معیارها با روش سلسله مراتبی

لحاظ کردن این تحقیق در یک محیط تصمیم گیری چندمعیاره، روش های قابل اجرایی را برای یک تصمیم گیری علمی برای مشکلاتی که دارای معیارهای گوناگونی هستند، در دسترس قرار می دهد (Kiker et all, 2005). روش سلسله مراتبی یک روش مرسوم وزن دهی به معیارها است. در این روش به جهت محاسبه وزن معیارها ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری متشکل از درایه‌های اعداد ۱ تا ۹ با مقایسه زوجی معیارهای مکان یابی ایجاد شده، سپس ماتریس مذکور نرمال گردیده و از میانگین هر سطر ارزش وزن معیارهای ورودی ایجاد می‌شود.

❖ ترکیب نقشه معیارها با تاپسیس

مهمترین اصل در روش مذکور انتخاب یک ناحیه در جهت نصب سنجنده بر اساس نزدیکی به نقطه ایدهآل است. برای استفاده از روش مذکور گام هایی به شرح زیر طی خواهد شد (مومنی و شریفی سلیم، ۹۰) و (مومنی، ۹۰) :

⁕ ایجاد ماتریس تصمیم(N)و نرمال‌سازی آن

⁕ ایجاد ماتریس نرمال موزون با رابطه (۱) که در آن W ماتریس قطری وزن است.

جهت به دست آوردن ماتریس نرمال موزون(V)، ماتریس نرمال شده (N) در ماتریس قطری وزن ها (W) ضرب می گردد.

$$V = N * W \qquad (1)$$

⁕ مشخص کردن راه حل ایده آل مثبت و منفی : راه حل ایده آل مثبت (V_j^+)، بیانگر بردار بهترین مقادیر هر شاخص ماتریس V است، و راه حل ایده آل منفی (V_j^-)، بیانگر بردار بدترین مقدار هر شاخص ماتریس V است.

⁕ محاسبه فاصله هر ناحیه از ایده آل مثبت (d_i^+) و منفی (d_i^-) با روابط (۲) و (۳) :

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^+)^2} \qquad i = 1,2,\ldots,m \qquad (2)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2} \qquad i = 1,2,\ldots,m \qquad (3)$$

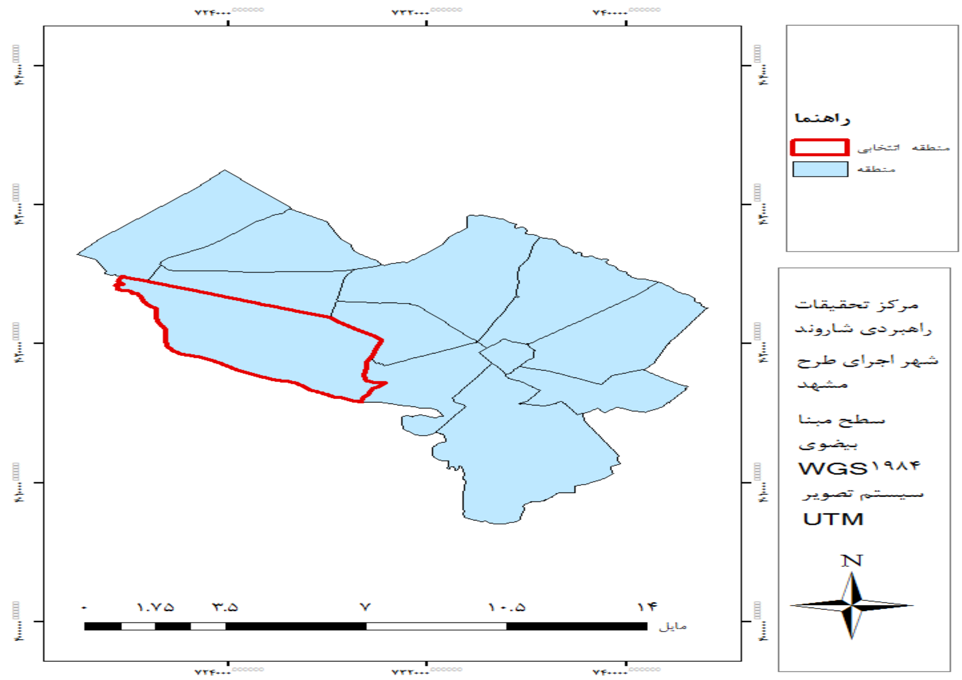
* مشخص کردن میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه حل ایده آل با رابطه زیر:

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \qquad (4)$$

نتایج و بحث

به منظور اجرای طرح مکان‌یابی سنجنده های آلاینده های هوا، مراحل مذکور به این شرح پیاده سازی گردید:

مشخص کردن ناحیه اولیه: همانطور که پیشتر ذکر شد، فرض اولیه برای انتخاب منطقه مورد پایش به جهت جانمایی اولیه و یا در صورت ضرورت ، بازجانمایی، به دو صورت است: کل منطقه شهری و یا بخشی از آن. در این طرح با فرض دوم که ممکن است تنها یکی از سنجنده های جانمایی شده‌ی آخرین جانمایی، نیازمند بازجانمایی باشد، منطقه مطالعاتی به یکی از مناطق شهری محدود گردید به نحوی که این منطقه هم از نظر تراکم جمعیتی و هم از جهت مساحت، در حداقل های ممکن نبوده و تناسب با معنایی با نوع سنجنده ی منتخب (سنجنده شهری در تماس عمومی با ساکنین) داشته باشد. ضمن تاکیدبر این نکته که بر اساس نیاز به برآورد آلاینده ی CO در فازهای آتی تحقیقات گروه پژوهشی حاضر، ابتدا منطقه ای که از نظر شدت آلایندگی بیشتر از سایر مناطق تحت تاثیر آلاینده CO قرار دارد، و در عین حال از تراکم جمعیتی نسبتا بالا و نیز مساحت کافی برخوردار باشد، انتخاب گردید. لحاظ نمودن همه این موارد، به انتخاب منطقه ۹ شهرداری مشهد به عنوان منطقه نمونه ی تحقیقاتی این پژوهشگران منجر شده است.



تصویر ٤. نمایی از نقشه مربوط به ناحیه مرکزی در پایلوت انتخابی

ماخذ:نویسندگان

انتخاب نوع سنجند: با توجه به استاندارد منتخب در این پژوهش که مربوط به EPA می باشد، در این پژوهش به شرایط حداقلی برای نصب سنجنده های نوع B پرداخته شده است؛ و یا به عبارت دیگر، به استناد دسته بندی سه گانه ی ایستگاه های سنجنده در گزارش کیفیت هوای مشهد در سال ۱۳۹۴ (گزارش کیفیت هوای مشهد، ۹۴) به صورت ایستگاه های شهری، حومه شهری و ترافیکی، که مشابهت زیادی به سه رده از بین کل سنجنده های EPA دارد، تنها به "ایستگاه سنجنده شهری" استناد شده است. ایستگاه های سنجنده شهری، به منظور بررسی تاثیر آلاینده ها بر جمعیت در معرض آلودگی در شهرها احداث می شود. فاصله ایستگاه های شهری از خیابان های پرترافیک بر حسب میزان متوسط ترافیک روزانه (تعداد وسیله نقلیه)، متفاوت بوده و از حدود ۱۰ تا ۲۰۰ متر متغیر می باشد. همچنین ایستگاه شهری بایستی از تعمیرگاه های اتومبیل و پارکینگ های بزرگ حداقل ۲۰۰ متر و از ایستگاه های اتوبوس و تاکسی در حدود ۱۰۰ متر فاصله داشته باشد (گزارش کیفیت هوای مشهد، ۹۴). نیز در استاندارد EPA معیارهای عمومی برای تمامی انواع ایستگاه های سنجش کیفیت هوای محیط از جمله: داشتن حداقل ۲۰ متر فاصله از فضای سبز، حداقل فاصله از موانع دو برابر ارتفاع مانع، عدم وجود محدودیت جریان هوا در ۲۷۰ درجه اطراف ایستگاه، دوربودن از هر منبع آلودگی نظیر دودکش و نظایر آن به طوری که تا حد امکان محل احداث ایستگاه ، نماینده مناطق اطراف باشد، لحاظ شده است. امنیت و ایمنی تجهیزات، ایمنی پرسنل، دسترسی به برق و مخابرات و سایر تجهیزات مورد نیاز نیز از جمله مواردی هستند که در این استاندارد در نظر گرفته شده اند (موفق و همکاران، ۸۸: ۱). نقاطی مانند پارک ها، خیابان های خلوت و بدون ترافیک برای این ایستگاه مناسب می باشد. ارتفاع سنسورهای نمونه برداری در این ایستگاه ۳+۰.۵ متر از سطح زمین می باشد (موفق و همکاران، ۸۸: ۳).

مشخص کردن تعداد سنجنده : یکی دیگر از مهمترین مسائل در استراتژی مکان یابی سنجنده‌ها، پوشش مناسب مناطق با آن است که این مسئله با مشخص کردن تعداد مناسب از سنجنده‌ها حاصل خواهد شد. انتخاب تعداد بهینه سنجنده‌ها علاوه بر آنکه منجر به پوشش مناسب منطقه می‌گردد منجر به کاهش هزینه ناشی از خرید یا نگه داری خواهد شد. به منظور مشخص کردن تعداد سنجنده میزان جمعیت مربوط به منطقه انتخابی و نیازمند پایش در نظر گرفته شده و با تاکید مجدد بر آلاینده هدف پایش در فازهای آتی این تحقیقات یعنی مونوکسید کربن(CO) ، تعداد سنجنده‌ها از استاندارد اروپایی EC طبق جدول شماره ۱ انتخاب شده است. بنابراین با توجه به جمعیت ۲۵۳۵۱۳ نفری در منطقه ۹ شهرداری مشهد (به جهت تطابق اطلاعات آماری با حدود مرزها و جزئیات لایه های GIS موجود از طرح جامع شهر مشهد) تعداد یک سنجنده برای جانمایی برآورد گردید؛ ولیکن به جهت پشتیبانی از تغییرات احتمالی در آینده، سه برابر این حداقل مورد نیاز، در فرایند محاسبات جانمایی سنجنده ها وارد خواهد شد. به نحوی که اولویت اول، پیشنهاد اول خواهد بود و دو اولویت بعدی، در صورت ضرورت جابجایی ایستگاه، مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

جدول ۱. برآورد تعداد سنجنده ها برای مناطق با میزان غلظت بالای آلایندگی طبق استانداردهای اروپا و آمریکا

جمعیت (نفر)	تعداد تقریبی ایستگاههای سنجش PM10 و SO2 برای مناطق با میزان غلظت بالای آلاینده (EPA, 1998)	حداقل تعداد ایستگاه اندازه گیری SO2, NO2, PM10, Pb ،CO برای مناطقی که غلظت آلاینده‌ها از مقدار برآورد اولیه بسیاربالاتر است (EC, 1999 and 2000)
۰-۲۵۰،۰۰۰	۱-۲	۱
۲۵۰،۰۰۰-۵۰۰،۰۰۰	۳-۴	۲
۵۰۰،۰۰۰-۷۵۰،۰۰۰	۴-۸	۲
۷۵۰،۰۰۰-۱میلیون		۳
۱میلیون-۱/۵میلیون	۶-۱۰	۴
۱/۵میلیون-۲میلیون		۵
۲میلیون-۲/۷۵میلیون		۶
۲/۷۵میلیون-۳/۷۵میلیون		۷
۳/۷۵میلیون-۴/۷۵میلیون		۸
۴/۷۵میلیون-۶میلیون		۹
بیشتر از ۶ میلیون		۱۰

ماخذ: نگارندگان اقتباس از (EPA, 1998) و (1999 and 2000)

استراتژی مکان یابی: هدف از استراتژی مکان یابی سنجنده، انتخاب معیارهای مناسب مکان یابی و همچنین مشخص کردن یک روش تحلیلی مناسب برای مشخص کردن اهمیت معیارها و ترکیب آنهاست. رویکرد پیشنهادی تحقیق حاضر، جهت دستیابی به این هدف مراحلی به شرح زیر را طی خواهد کرد:

• **انتخاب لایه‌های مکان یابی**

باتوجه به رویکرد بهره مندی از سیستم اطلاعات جغرافیایی در فرآیند جانمایی سنجنده ها در این پژوهش، اولین و اصلی ترین اقدام در استراتژی مکان یابی سنجنده محیط زیستی، مشخص کردن لایه‌های مکان یابی مورد نیاز است که پس از بررسی و تصمیم گیری به جهت انتخاب معیارهای موثر، امکان پذیر می باشد. جدول شماره (۲) نمایی از لایه‌های در نظر گرفته شده برای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. انتخاب لایه‌های مکان یابی بر اساس معیارهایی مانند ضرورت دسترسی ایستگاه به برخی از امکانات مانند دسترسی به مخابرات و برق و ...و یا ضرورت حفظ حریم از برخی موانع اثرگذار بر سنجش آلاینده ها مانند فاصله از خیابان های پرترافیک، ایستگاه های تاکسی و اتوبوس، تعمیرگاه های اتومبیل و پارکینگ های بزرگ و ...خواهد بود.

جدول۲. معیارهای مکان یابی سنجنده های شهری پایش آلاینده های هوا

معیار پیشنهادی	توضیحات	فواصل بر اساس استانداردهای بین المللی موجود و یا مورد اشاره در گزارش کیفیت هوای مشهد ۱۳۹٤
فاصله از فضای سبز	سنجنده در نزدیکی مناطق سبز واقع است.	حداقل ۲۰ متر
فاصله از معابر شهری	فاصله ایستگاه های شهری از خیابان های پرترافیک بر حسب میزان متوسط ترافیک روزانه (تعداد وسیله نقلیه)، متفاوت بوده و از حدود ۱۰ متر تا ۲۰۰ متر متغیر می باشد.که در این طرح شریانی های درجه یک و دو مدنظر واقع شد.	بین ۱۰۰ الی ۲۰۰ متر
فاصله از پارکینگ و تعمیرگاه	ایستگاه های شهری بایستی از تعمیرگاه های اتومبیلی و پارکینگ های بزرگ حداقل ۲۰۰ متر فاصله داشته باشند.	حداقل ۲۰۰ متر
فاصله از ایستگاه های اتوبوس و تاکسی	ایستگاه های شهری بایستی از ایستگاه های اتوبوس و تاکسی حدود ۱۰۰ متر فاصله داشته باشند.	حدود ۱۰۰ متر
فاصله از مراکز انرژی	به جهت تامین دسترسی به تاسیسات ضروری ایستگاه های سنجش، دسترسی به خطوط توزیع برق و مخابرات در نظر گرفته شده است.	کمتر از ۱۰ متر (نظر کارشناسی)

ماخذ: استانداردهای بین المللی و گزارش کیفیت هوای مشهد، ۱۳۹٤

• **وزندهی به معیارهای مکان یابی**

محاسبه وزن معیارهای ورودی با روش سلسله مراتبی انجام گرفته است و به منظور امکان استفاده از محاسبات روش سلسله مراتبی، معیارهای پیش‌فرض به صورت زوجی با استفاده از مقیاس ساعتی (اعداد ۱ تا ۹) مقایسه شدند سپس ماتریس مقایسات زوجی تشکیل گردید و در نهایت با محاسبات روش سلسله مراتبی، ملاک محاسبه وزن نهایی معیارهای ورودی قرار گرفت. جدول شماره (۳) ، خروجی مربوط به ماتریس های مقایسه زوجی و وزن نهایی مربوط به معیارهای ورودی را نشان می دهد. به منظور ارزیابی محاسبات، شاخص ناسازگاری در روش سلسله مراتبی به میزان ۰/۰۳ محاسبه شد که با توجه به حد آستانه ۰/۱، سازگاری محاسبات صورت پذیرفته را در روش سلسله مراتبی نشان می‌دهد.

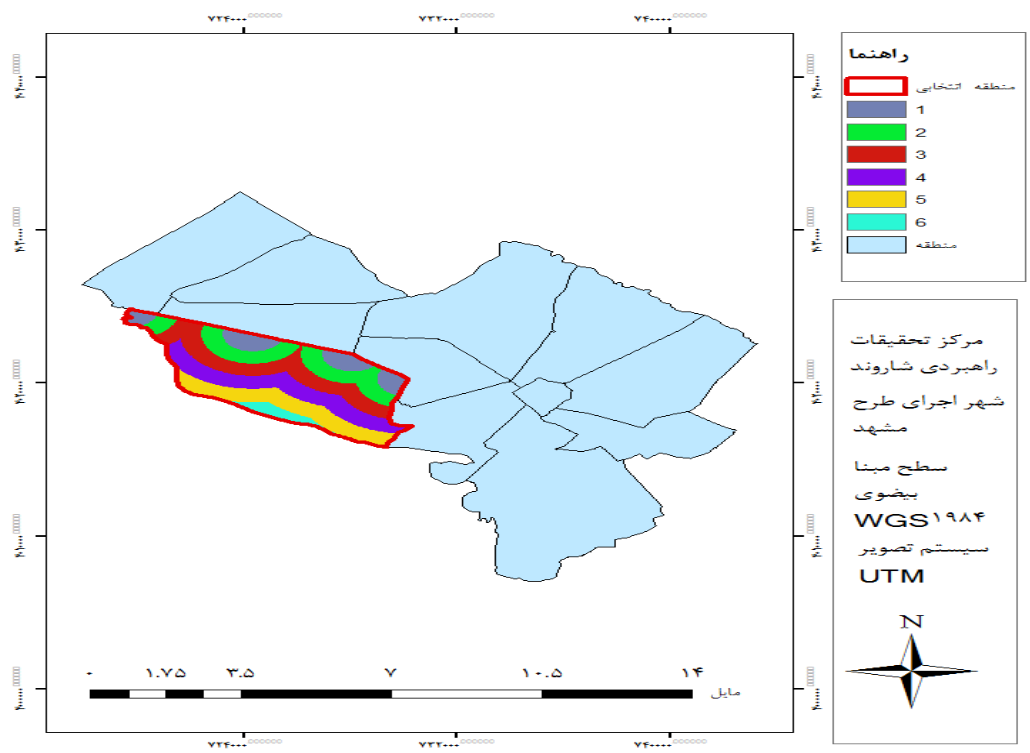
جدول ۳. مقایسه زوجی معیارهای مکان یابی و محاسبه وزن و شاخص ناسازگاری

معیارها	معابر شهری	پارکینگ و تعمیرگاه	ایستگاه اتوبوس و تاکسی	مرکز انرژی	فضای سبز	وزن محاسبه شده
معابر شهری	۱	۱	۲	۲	۳	0.30
پارکینگ و تعمیرگاه	-	۱	۲	۲	۳	0.30
ایستگاه اتوبوس و تاکسی	-	-	۱	۱	۲	0.16
مرکز انرژی	-	-	-	۱	۲	0.16
فضای سبز	-	-	-	-	۱	0.08
شاخص ناسازگاری =0.003						

ماخذ:نویسندگان

• آماده‌سازی لایه‌های مکان یابی

بعد از انتخاب معیارهای اولیه به منظور محاسبه فاصله هر بخش از فضای مورد مطالعه از فضای سبز، معابر شهری درجه یک و دو، ایستگاه های اتوبوس وتاکسی و مراکز انرژی از توابع مکانی محاسبه فاصله استفاده گردید و هریک از لایه‌های مذکور تولید شد. سپس هر لایه با استفاده از تحلیل کلاسه‌بندی به کلاس هایی با ارزش ۱ تا ۹ طبقه‌بندی شدند. عدد۱ به معنای کمترین اولویت برای نصب سنجنده و ۹ به معنای بالاترین اولویت برای نصب سنجنده می باشد. تصویر (۵) به عنوان نمونه، لایه مربوط به فاصله از ایستگاه های اتوبوس و تاکسی و کلاسه بندی آن را نشان می‌دهد که همین فرآیند برای کلیه لایه‌ها به تعداد معیارهای اتخاذ شده در جدول شماره (۲)، انجام شده است.

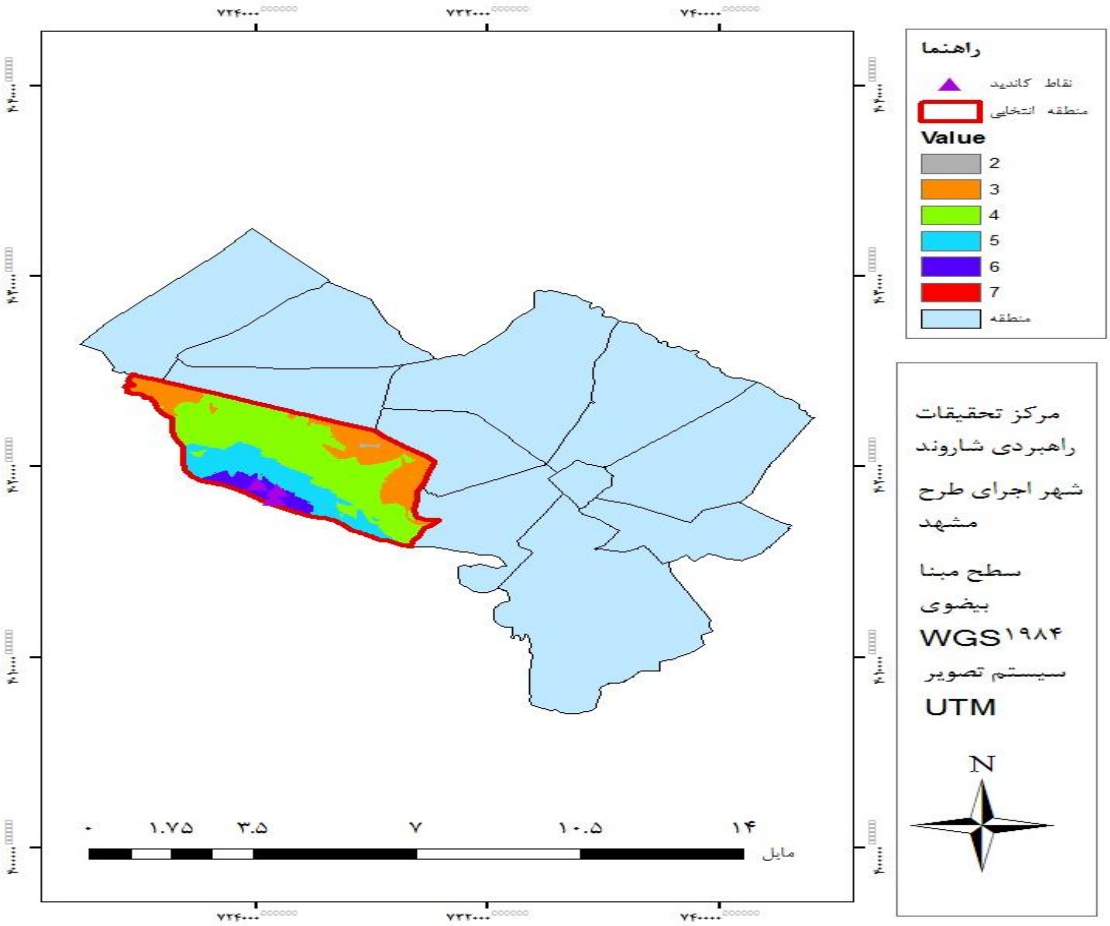


تصویر ۵. نمایی از نقشه مربوط به ایجاد لایه فاصله تا پایانه اتوبوس و تاکسی و کلاسه بندی آن

ماخذ:نویسندگان

- **همپوشانی لایه‌های ورودی به منظور انتخاب مناطق کاندید اولیه**

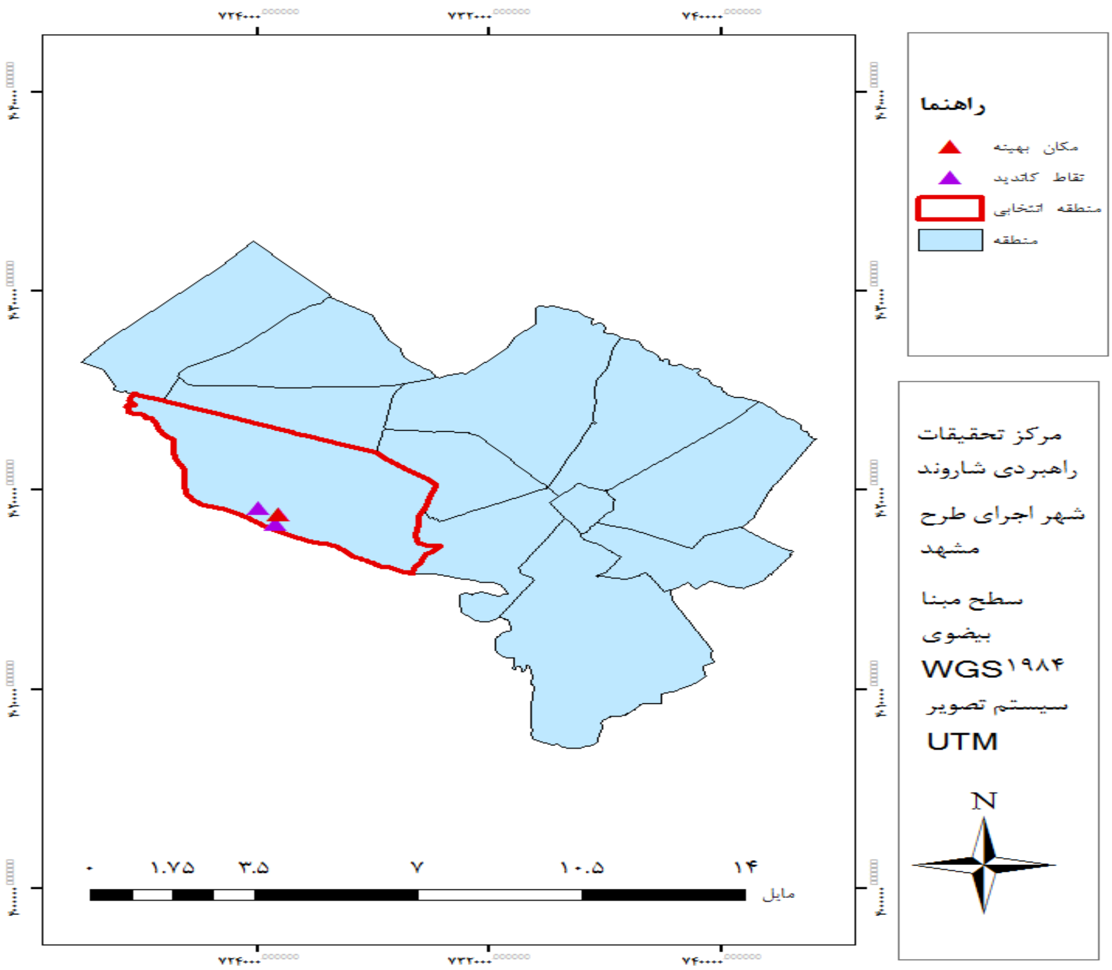
به منظور مشخص کردن مناطق کاندید اولیه از همپوشانی لایه‌های ورودی با روش همپوشانی وزندار استفاده شده است که نتیجه ابتدایی آن امکان مشخص کردن مناطق کاندید اولیه را برای نصب سنجنده نشان می‌دهد. پس از اجرای تحلیل همپوشانی از بین مناطق با بیشترین امتیاز تعدادی منطقه به عنوان مناطق ایده آل برای نصب سنجنده انتخاب شدند که در ادامه برای انتخاب مکان بهینه نصب سنجنده در مرحله بعدی مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۶) خروجی همپوشانی را همراه با نقاط کاندید برای جانمایی سنجنده بر روی نقشه نشان می دهد.



تصویر ٦. مکان های بهینه اولیه
ماخذ:نویسندگان

- **مشخص کردن مکان بهینه نهایی**

پس از انتخاب تعدادی ناحیه پایلوت در لایه همپوشانی شده به منظور دقت بهتر انتخاب ناحیه بهینه از تحلیل تاپسیس استفاده شده است و مناطق بهینه بر اساس روش تاپسیس مجددا مقایسه شدند تا در نهایت منطقه بهینه نهایی برای نصب سنجنده انتخاب شود. منطقه بهینه نهایی منتخب دارای بیشترین شاخص نزدیکی در روش تاپسیس خواهد بود. جدول (۴) نمایی از مقایسه مناطق بهینه با روش تاپسیس، و همچنین رتبه‌بندی نهایی نقاط انتخابی را نشان می دهد. به ترتیب نقاط۲، ۱، و ۳ دارای اولویت هستند . به نحوی که بر اساس تعداد سنجنده برآورد شده ، فقط یک اولویت در ابتدا پیشنهاد می شود و دو اولویت بعدی صرفا به جهت پشتیبانی از حداقل تعداد مورد نیاز در منطقه، در آینده ، در محاسبات وارد و نتیجه آن ارائه شده است. تصویر (۷) نیز مکان های پیشنهادی برای سنجنده ی منطقه ۹ را نمایش می دهد.



تصویر ۷. مکان بهینه انتخابی به همراه سایر مکان های کاندید
ماخذ:نویسندگان

جدول۳. جدول مربوط به مقایسه مناطق اولیه با روش تاپسیس

معیارها	معابر شهری +	پارکینگ و تعمیرگاه +	ایستگاه اتوبوس و تاکسی +	مرکز انرژی −	فضای سبز −	شاخص نزدیکی
۱	0.53	0.58	0.52	0.69	0.14	0.43
۲	0.51	0.54	0.57	0.31	0.50	0.53
۳	0.66	0.60	0.63	0.64	0.85	0.41

ماخذ:نویسندگان

نتیجه گیری

علی رغم کمبود مطالعات پایه در زمینه پایش آلاینده های هوا با تاکید بر جانمایی بهینه ایستگاه های پایش، پژوهشگران در طرح حاضر تلاش کردند با ارائه تکنیک های جدید در این حوزه و با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی، توام با بررسی کارشناسانه ی معیارهای استاندارد جانمایی این سنجنده ها، روشی کاربردی ارائه نمایند. سناریوی این پژوهش در چهار مرحله کلی تدوین گردید. ابتدا ناحیه مطالعاتی بر اساس نیاز شهر (در سطح کل شهر و یا یک منطقه محدود از شهر) در زمینه جانمایی سنجنده انتخاب گردید، سپس با تمرکز بر روی تعیین نوع سنجنده بر اساس تعاریف و استانداردهای موجود بین

المللی و یا نیاز منطقه مطالعاتی، به انتخاب نوع سنجنده پرداخته شد. مرحله بعد با برآورد تعداد سنجنده مورد نیاز بر اساس تراکم جمعیتی منطقه منتخب انجام گردید و پس از طی این سه مرحله، نهایتا بستر لازم برای ورود به مرحله چهارم یعنی استراتژی اصلی پیشنهاد برای مکان یابی سنجنده آلاینده های هوا فراهم گردید. طی ورود به این استراتژی، معیارهای مکان یابی بر اساس نوع سنجنده انتخاب گردید و با روش سلسه مراتبی به معیارها وزن داده شد. لایه های GIS از طرح جامع شهر مشهد متناسب با معیارهای منتخب در مرحله پیشین، انتخاب گردید و با همپوشانی آن ها، مناطق کاندید اولیه به صورت سه برابر نیاز منطقه به تعداد سنجنده، مشخص گردید. نهایتا به منظور انتخاب بهترین مکان، از تحلیل تاپسیس برای رتبه بندی مناطق کاندید استفاده شد به طوری که اولین اولویت مکانی با بیشترین شاخص نزدیکی در نتایج تاپسیس به عنوان مکان پیشنهادی برای جانمایی سنجنده در منطقه ۹ شهرداری، در جنوب غربی شهر مقدس مشهد ارائه گردیده است.

فهرست منابع

• اشرفی، خسرو ؛ قادر، سرمد؛ اصفهانیان، وحید؛ متصدی، سعید. (۱۳۸۶). جانمایی ایستگاه های سنجش آلودگی هوا در تهران بزرگ. محیط شناسی. سال سی و سوم. شماره ۴۴. زمستان ۸۶. صفحات ۱-۱۰.

• اکبری، الهه؛ فاخری، معصومه؛ پورغلامحسن، عفت؛ اکبری زهرا. (۱۳۹۳). پهنه بندی ماهانه میزان آلودگی هوا و بررسی نحوه ارتباط آن با عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: شهر مشهد). محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۶۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، صفحات ۵۳۳-۵۴۷.

• خبری، زهرا؛ موسویان ندوشن، نرجس السادات؛ نژادکورکی، فرهاد؛ منصوری، نبی ا... . (۱۳۹۲). تاثیر مدل رقومی ارتفاعی در مدلسازی آلودگی هوا با استفاده از ائرمود (AERMOD). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. سال چهارم. شماره چهارم. زمستان ۱۳۹۲.

• سامانه سالنامه آماری مرکز آمار ایران، سالنامه آماری استان خراسان رضوی؛ فصل اول: سرزمین و آب و هوا؛ ۱۳۹۱

• سایت استانداری استان خراسان رضوی: http://amar.khorasan.ir

• سبحان اردکانی، سهیل؛ اسماعیلی ساری، عباس؛ چراغی، مهرداد؛ طیبی، لیما و قاسمپوری، محمود . (۱۳۸۵). تعیین کیفیت بهداشتی هوای تهران در سال ۱۳۸۳ با استفاده از شاخص کیفیت هوا. علوم و تکنولوژی محیط زیست. دوره هشتم. شماره ۴. زمستان ۸۵. صفحات ۳۳-۳۸.

• کرباسیان، مهدی؛ دشتی، مهدی؛ اسداللهی، احمدرضا. (۱۳۹۰). مدل ترکیبی تحلیل پوششی داده ها و مکان یابی تسهیلات حساس با ملاحظه اصل پراکندگی. مجله علوم و فناوری های پدافند غیر عامل، سال دوم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۰، صفحات ۱۶۱-۱۶۷.

• کفاش چرندابی، ندا؛ آل شیخ، علی اصغر؛ کریمی، محمد. (۱۳۹۱). مکان یابی بهینه ایستگاه های پایش آلودگی هوا با استفاده از روشهای فرارتبه ای. محیط شناسی. سال سی و هشتم. شماره ۶۲. تابستان ۹۱، صفحات ۸۲-۶۹.

• کفاش چرندابی، ندا؛ آل شیخ، علی اصغر . (۱۳۹۰). استفاده از روش prometee برای جانمایی ایستگاه های پایش آلودگی هوا. همایش ژئوماتیک ۱۳۹۰.

• گزارش کیفیت هوای مشهد در سال ۱۳۹۴، مرکز پایش آلاینده های زیست محیطی مشهد، http:// epmc.mashhad.ir

• موفق، افسانه؛ محمدرضا، دوستی، اعظم السادات؛ دلبری.(۱۳۸۸). ضوابط و استانداردهای مکانیابی ایستگاههای سنجش آلودگی هوا. سومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، http://www.civilica.com/Paper-CEE۰۳-CEE۰۳_۲۴۲.html

• مومنی، منصور ؛ شریفی سلیم، علیرضا. ۱۳۹۰. مدل ها و نرم افزارهای تصمیم گیری چند معیاره. انتشارات دانشگاه تهران.

• مومنی، منصور. ۱۳۹۰. مباحث نوین تحقیق در عملیات. تهران.

• مهندسان مشاور فرنهاد (۱۳۸۷)، طرح توسعه و عمران (جامع) کلانشهر مشهد مقدس، مطالعات پایه محیط طبیعی، ویرایش اول.

• ندافی،کاظم و همکاران . ۱۳۹۰. راهنمای محاسبه، تعیین و اعلام شاخص کیفیت هوا. مرکز سلامت محیط و کار و پژوهشکده محیط زیست. تهران.

• Behran, S. and Ghamkar, A., (2007). Losses of air pollution in Tehran. Human and environmental Journal. Issue 4, 15, 24-31 (in persian).

• Hamraz. H , Sadeghi-Niaraki. A, Omati. M, Noori. N, (2014), GIS-Based Air Pollution Monitoring using Static Stations and Mobile Sensor in Tehran/Iran. International Journal of

Scientific Research in Environmental Sciences, 2(12), pp. 435-448, 2014

- Herva., M. and Roca., E. 2013., Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation., Journal of Cleaner Production., 39., 355-371.
- Kiker. G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P., & Linkovjj, I. (2005). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. Integrated Environmental Assessment and Management, 1(2), 95-108.
- X. Xing-Ming., P. An-Hua., (2013). Material selection using PROMETHEE combined with analytic network process under hybrid environment. , Material and Design., 47., 643-652.